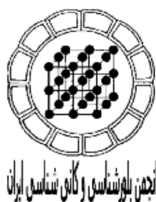
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و هشتم، شمارهٔ دوم، تابستان ۹۹، از صفحهٔ ۴۶۱ تا ۴۷۴



شناسایی و تفکیک منطقه‌های با خلوص بالای کانی کلسیت در واحدهای کربناتی با استفاده از داده‌های چندطیفی استر و سنتینل ۲ (بررسی موردی شمال غرب شهرکرد)

عاطفه بزرگمهر*[۱]، اسماعیل مرادیان[۲]، حمیدرضا ریاحی بختیاری[۱]، علیرضا داودیان[۲]، محسن کریمی[۳]، ناهید شبانیان[۲]

۱-گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۳- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۴/۱۷، نسخه نهایی: ۹۸/۸/۸)

چکیده: امروزه بررسی‌های زمین‌شناسی و شناسایی مواد معدنی با استفاده از فن‌آوری سنجش از دور، جایگاه ویژه‌ای در تعیین موقعیت کانسارها دارد و می‌تواند در بخش پی‌جویی اولیه به کار رود. در این پژوهش، واحدهای کربناتی با خلوص کلسیت بالا با استفاده از داده‌های چندطیفی استر و سنتینل ۲ شناسایی و تفکیک شدند. برای درستی‌سنجی و تطبیق نتایج، پیمایش صحرایی انجام شد و نمونه‌های سنگی برداشت شده تجزیه شیمیایی به روش طیف‌سنجی فلئورسانس پرتوی X (XRF) و تجزیه کانی‌شناسی به روش پراش پرتوی X (XRD) شدند. نتایج نشان داد که خلوص کانی کلسیت ($CaCO_3$) در واحد کربناتی شناسایی شده ۹۷٫۲۲ درصد است. با پردازش داده‌های استر، قدرت تفکیک مکانی نوارهای مرئی و فروسرخ موج کوتاه با استفاده از داده کمکی سنتینل ۲، به ۱۰ متر بهبود یافت. سپس ترکیب نواری ۸۳۱ و همچنین الگوریتم‌های حذف پیوستار (CR)، فیلتر تطبیق یافته (MF) و نقشه برداری زاویه طیفی (SAM) در کنار شاخص طیفی کلسیت (CI) برای تشخیص کانی کلسیت اعمال شد. با مقایسه نتایج الگوریتم‌ها، تصویر برآمده از الگوریتم MF به خاطر شباهتی که به تصویر شاخص طیفی کلسیت داشت در رده‌بندی به روش SAM استفاده شد و سرانجام نقشه پراکنش کلسیت ایجاد گردید. نتایج به دست آمده از مقایسه میزان تفکیک کانی کلسیت در روش SAM با شاخص طیفی کلسیت نشان داد که در این رده بندی، ۸۳٫۶۶ درصد از منطقه‌های کلسیت‌دار بدرستی به این کانی تعلق گرفته است. از این رو با استفاده از شاخص‌ها و روش‌های رده‌بندی بر پایه رفتار طیفی، می‌توان مواد معدنی را با دقت قابل قبول و کمترین هزینه شناسایی کرد.

واژه‌های کلیدی: *تصاویر ماهواره‌ای استر؛ پی‌جویی؛ کانی کلسیت ($CaCO_3$)؛ نقشه‌برداری زاویه طیفی.*

مقدمه

سنجش از راه دور یک روش کاربردی و کم هزینه برای شناسایی واحدهای مختلف سنگ‌شناسی و ساختاری در بررسی‌های زمین‌شناسی است. این روش با تسهیل نمونه‌برداری و تهیه نقشه زمین‌شناسی در مناطقی با ناهمواری‌های بسیار به طور گسترده توسط زمین‌شناسان استفاده می‌شود. تصاویر ماهواره‌ای چندبعدی که از این روش به دست می‌آیند نقش و توانایی موثری در ارائه اطلاعات رخداد و توزیع مواد معدنی و سنگ‌ها دارند [۱-۷]. با توجه به تفاوت تابش انرژی الکترومغناطیسی بر هر یک از مواد معدنی در سطح زمین، رفتار بازتابی که مواد معدنی بر اساس ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خود نشان می‌دهند نیز یکسان نیست. در نتیجه، این امر

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۴۰۵۲۴۶۱، پست الکترونیکی: Atefeh.Bozorgmehr@yahoo.com

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.14.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.461]

بستری را فراهم می‌کند که بر اساس رفتار طیفی ویژه هر کانی و سنگ، امکان برآورد و تشخیص آنها با استفاده از تصاویر سنجش از دور به خوبی فراهم می شود [۸، ۹]. سنجنده استر[1] از سنجنده‌های چند طیفی است که با دارا بودن طیف گسترده‌ای از طول موج‌های مرئی تا فروسرخ موج کوتاه و گرمایی، به خوبی توانسته است نیازهای پژوهشگران را در این زمینه برآورده کند. در سنجنده استر با وجود نوار جذبی در نزدیکی طول موج ۲٫۳۱-۲٫۳۳ میکرومتر در نوار طیفی ۸ نسبت به سایر سنجنده‌ها برای تشخیص و نقشه‌برداری از سنگ‌های کربنات مختلف برتری دارد. به تازگی، باساوارجاپا و همکارن [۱۰] جذب کانی کلسیت را در ۲٫۳۲ میکرومتر معرفی کرده‌اند. ترکیبات رنگی کاذب (FCC)، و روش حذف پیوستار[2] (CR) [۱۱] و همچنین شاخص‌های طیفی در تشخیص نواحی معدنی نقش موثری داشته‌اند و پژوهشگران نیز به کارایی شاخص طیفی کلسیت پی برده‌اند [۱۲-۱۴]. روش نقشه‌برداری زاویه طیفی[3] (SAM) از روش‌های مرسوم رده‌بندی نظارت شده است که با کمترین اختلاف زاویه طیفی پیکسل‌ها، موقعیت کانی‌ها را در تصویر مشخص می‌کند. از مزیت‌های این روش شناسایی دقیق نوع و محل کانی‌ها و گسترش و شدت آن‌هاست [۱۵-۱۷]. روآن و مارس [۱۸] با استفاده از روش‌های فیلتر تطبیق یافته[4] (MF) و SAM بر داده استر، سنگ‌های کلسیت را از سایر مواد معدنی جدا کردند. نتایج پژوهش‌های روآن و همکاران [۱۹] و کیو و همکاران [۲۰] نشان داد که روش‌های MF؛ SAM و برازش سیمای طیفی (SFF) در تشخیص مواد معدنی و تهیه نقشه زمین-شناسی با دقت قابل قبول می‌توان استفاده کرد. در پژوهش-هایی دیگر، راجندران و همکاران [۲۱، ۲۲] نشان دادند که روش SAM وجود مواد معدنی کربناتی در سنگ آهک را بدرستی تشخیص داده و در مناطق خشک با ناهمواری بسیار که نمونه‌گیری جامع و قابل دسترس برای نقشه‌برداری زمین-شناسی دشوار است، قابل استفاده است.

با وجود پراکندگی گسترده واحدهای کربناتی در استان چهارمحال و بختیاری، تنها چند بخش برای اکتشاف و بهره-برداری سنگ تزیینی مورد توجه قرار گرفته است. به ویژه در بخش شمالی این استان که در پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان جای دارد. تنها بهره‌برداری اقتصادی از واحدهای کربناتی منطقه فقط مربوط به معادن شن و ماسه بوده است. اکتشاف توده معدنی مورد بررسی در این بخش از استان می‌تواند نشانگر مناطق امید بخش دیگر، در این گستره باشد. در این پژوهش، با استفاده از دانش سنجش از دور و با بررسی قابلیت الگوریتم-های مختلف CR، MF و SAM، کلسیت در واحدهای کربناتی با خلوص بالای کانی کلسیت براساس داده‌های چندطیفی استر و سنتینل ۲ در شمال غرب شهرکرد شناسایی شد.

1 - ASTER
2- Continuum Removal
3- Spectral Angle Mapper
4 - Matched filtering

زمین شناسی منطقه مورد بررسی

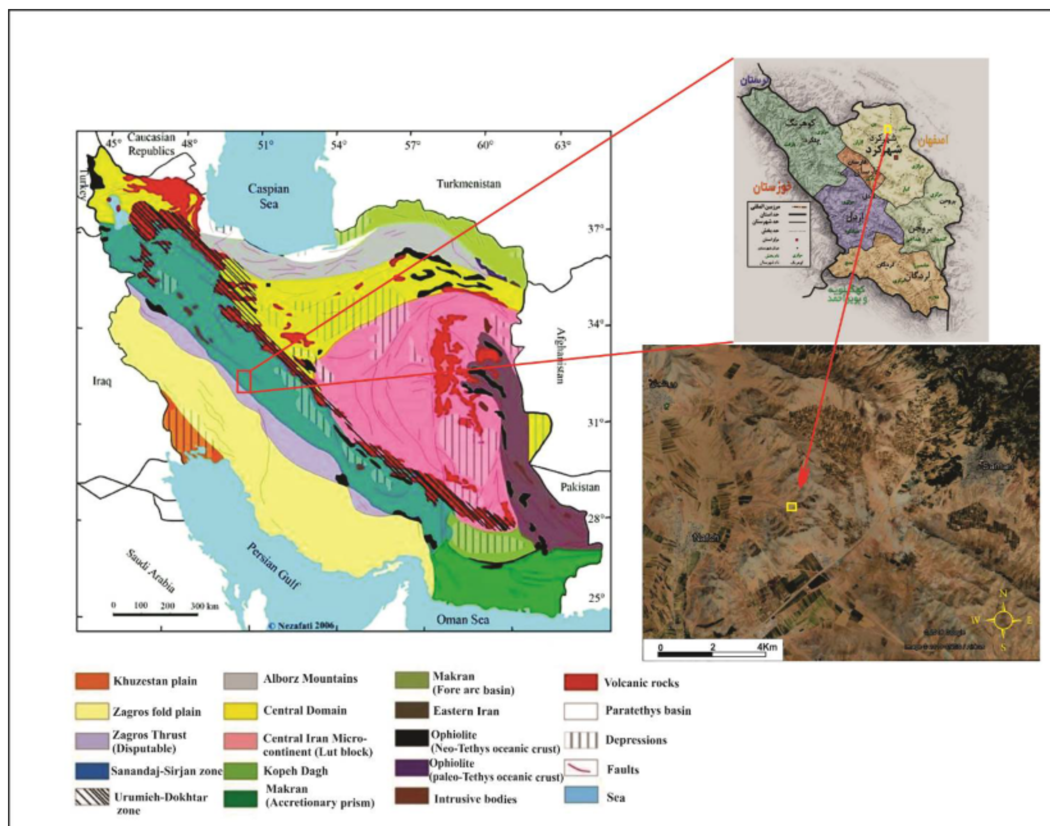
منطقه مورد بررسی در استان چهارمحال و بختیاری و در بخش مرکزی شهرستان شهرکرد، با مختصات جغرافیایی ″۵۹ ′۳۰ °۳۲ تا ″۱۹ ′۲۵ °۳۲ عرض شمالی و ″۱۴ ′۴۸ °۵۰ تا ″۳۲ ′۵۴ °۵۰ طول جغرافیایی واقع است. این منطقه از نظر زمین-شناسی در قسمت جنوبی پهنه زمین‌ساختاری سنندج-سیرجان [۲۳]، در زیرپهنه شهرکرد- مرغملک قرار دارد. این زیرپهنه گستره بزرگی از زمین‌شناسی چهارمحال را می‌سازد که گسل هفشجان-سودجان آن را به دو بخش تقسیم می‌کند (شکل ۱). واحدهای زمین‌شناسی اصلی این پهنه طبقه‌های کرتاسه هستند [۲۴]. تشکیل پهنه سنندج-سیرجان در این منطقه وابسته به باز و بسته شدن نئوتتیس بوده و دستخوش دگرشکلی‌های فراوانی شده است. ادامه زمین‌ساخت برخوردی بین صفحه عربی و پهنه سنندج-سیرجان باعث فعال شدن گسل‌های قدیمی و یا گسترش گسل‌های راندگی و رانده شدن مجموعه نهشته‌های رسوبی بصورت سفره‌های رورانده و فلس-های نابرجا در بخش‌های مختلف شده است [۲۵].

داده‌های مورد بررسی

در این پژوهش، از تصاویر دو ماهواره استر و سنتینل ۲ استفاده شد (جدول‌های ۱ و ۲). داده استر در سطح L1B مربوط به سطح یک تولیدات استر و برآمده از بازتابش ثبت شده در سنجنده است. تصاویر ماهواره‌ای استر دارای قدرت تفکیک مکانی متفاوتی در نوارهای گستره مرئی و فروسرخ نزدیک، فروسرخ موج کوتاه و گرمایی به ترتیب با اندازه پیکسل ۱۵، ۳۰ و ۹۰ متر است. همچنین به منظور افزایش و بهبود قدرت تفکیک مکانی تصاویر استر، از داده کمکی سنتینل ۲ (ترکیب نوارهای ۲، ۳ و ۴) به عنوان نوار همه رنگ [۲۶] با تفکیک ۱۰ متری در عملیات ادغام[5] استفاده شد.

5 - Fusion

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.14.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.461]



شکل ۱ موقعیت زمین‌ساختاری منطقه مورد بررسی در پهنه سنندج –سیرجان و تصویر گوگل ارث منطقه [۲۳].

جدول ۱ نوارهای سنجنده استر

طیف سنج	نوار	محدوده نوار (میکرومتر)	توان تفکیک مکانی(متر)
مرئی- مادون قرمز نزدیک	۱	۰٫۵۲-۰٫۶۰	۱۵
مرئی- مادون قرمز نزدیک	۲	۰٫۶۳-۰٫۶۹	۱۵
مرئی- مادون قرمز نزدیک	N۳	۰٫۷۸-۰٫۸۶	۱۵
مرئی- مادون قرمز نزدیک	B۳	۰٫۷۸-۰٫۸۶	۱۵
مادون قرمز موج کوتاه	۴	۱٫۶۰۰-۱٫۷۰۰	۳۰
مادون قرمز موج کوتاه	۵	۲٫۱۴۵-۲٫۱۸۵	۳۰
مادون قرمز موج کوتاه	۶	۲٫۱۸۵-۲٫۲۲۵	۳۰
مادون قرمز موج کوتاه	۷	۲٫۲۳۵-۲٫۲۸۵	۳۰
مادون قرمز موج کوتاه	۸	۲٫۲۹۵-۲٫۳۶۵	۳۰
مادون قرمز موج کوتاه	۹	۲٫۳۶۰-۲٫۴۳۰	۳۰
حرارتی	۱۰	۸٫۱۲۵-۸٫۴۷۵	۹۰
حرارتی	۱۱	۸٫۴۷۵-۸٫۸۲۵	۹۰
حرارتی	۱۲	۸٫۹۲۵-۹٫۲۷۵	۹۰
حرارتی	۱۳	۱۰٫۲۵-۱۰٫۹۵	۹۰
حرارتی	۱۴	۱۰٫۹۵-۱۱٫۶۵	۹۰

جدول ۲ نوارهای ماهواره سنتینل ۲ سنجنده MSI

نام نوار – طول موج(میکرومتر)	تفکیک مکانی	نام نوار – طول موج(میکرومتر)	تفکیک مکانی	نام نوار – طول موج(میکرومتر)	تفکیک مکانی
نوار ۱: آئروسل ۰٫۴۳	۶۰m	نوار ۵: لبه قرمز گیاهی ۰٫۷۰	۲۰m	نوار ۹: فروسرخ باریک ۰٫۸۶	۲۰m
نوار ۲: آبی ۰٫۴۹	۱۰m	نوار ۶: لبه قرمز گیاهی ۰٫۷۴	۲۰m	نوار ۱۰: بخار آب ۰٫۹۹	۶۰m
نوار ۳: سبز ۰٫۵۶	۱۰m	نوار ۸: لبه قرمز گیاهی ۰٫۷۸	۲۰m	نوار ۱۱: سیروس-فروسرخ موج کوتاه ۱٫۳۷	۶۰m
نوار ۴: قرمز ۰٫۶۵	۱۰m	نوار ۸ : فروسرخ نزدیک ۰٫۸۴	۲۰m	نوار ۱۲: فروسرخ موج کوتاه ۱٫۶۱	۲۰m
				نوار ۱۳ : فروسرخ موج کوتاه ۲٫۱۹	۲۰m

روش بررسی

بر همه داده‌ها، تصحیحات پرتوسنجی به منظور افزایش وضوح و در نتیجه افزایش میزان اطلاعات قابل استخراج از تصاویر مؤثر انجام شد. همچنین با روش تصحیح جوی آنی (QUAC) آثار جذب و پراکندگی تابش توسط ذرات جوی در تصاویر ماهواره‌ای حذف شد که با این کار و از بین بردن ذرات جو، اختلالات بازتاب با دقت می‌تواند کشف شود. ادغام داده‌های استر با سنتینل۲، به روش گرام اشمیت در محیط نرم افزار ENVI5.3 انجام شد و تصاویر جدید با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری و وضوح مکانی بیشتر به دست آمد. پس از پیش پردازش‌ها، برای نوارهای چند الگوریتم آشکارسازی به دست آمده به کار رفت (شکل ۲).

الگوریتم‌های آشکارسازی

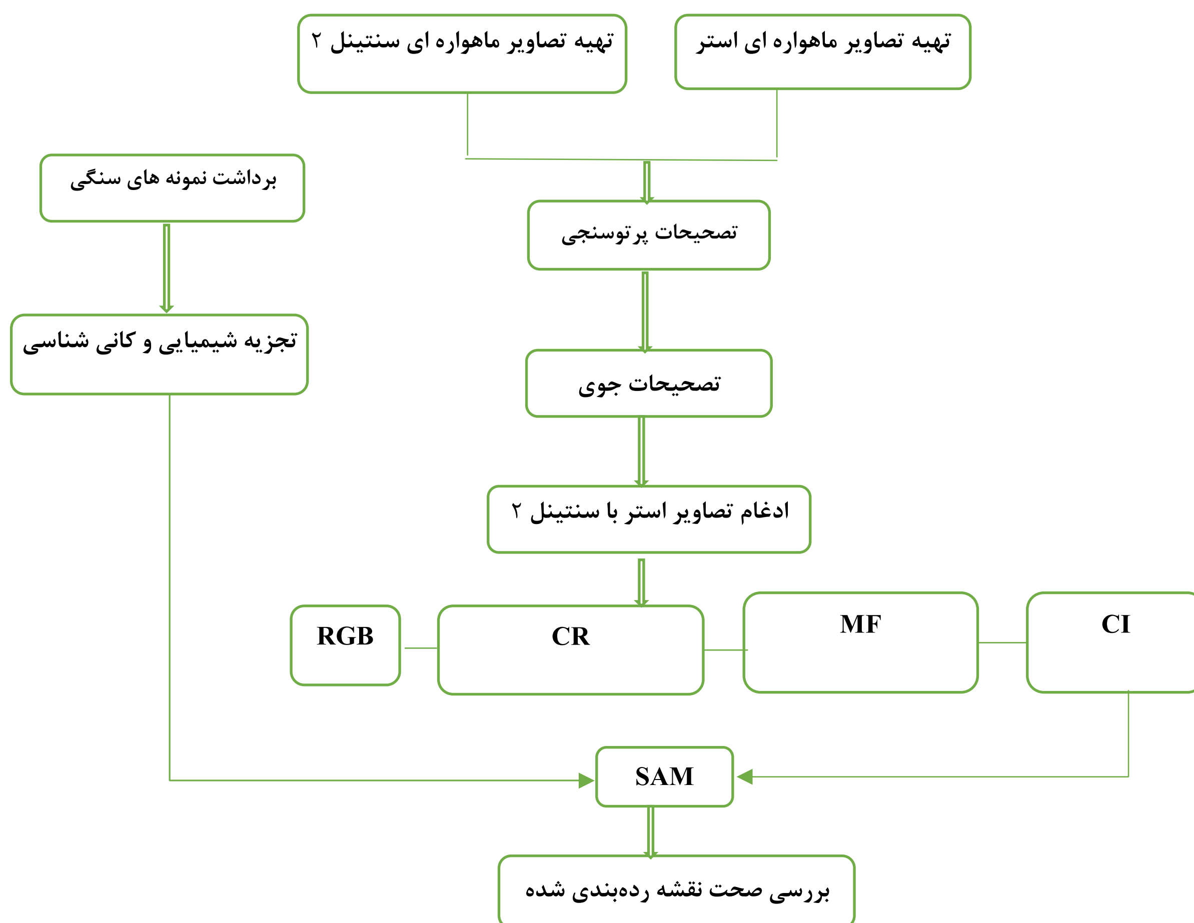
شاخص طیفی کلسیت (Calcite Index)

رفتار طیفی کانی کلسیت در گستره فروسرخ موج کوتاه سنجنده استر طوری عمل می‌کند که دارای جذب بالا در گستره نوار ۸ است و از طرف دیگر در گستره نوارهای ۶ و ۹ بیشترین بازتاب را دارد. بر اساس رفتار طیفی در این سه نوار شاخص طیفی کلسیت به دست آمد [۲۷]:

$$Cl_{SWIR} = \frac{Band_{6} * Band_{9}}{Band_{8} * Band_{8}} \qquad (1)$$

در این رابطه، $Band_8$ جذب کانی کلسیت در نوار ۸ و $Band_6$ و $Band_9$ بازتاب این کانی به ترتیب در نوارهای ۶ و ۹ است.

روش حذف پیوستار (CR) که توسط کلارک و راش در سال ۱۹۸۴ معرفی شد[۲۸] اغلب برای تحلیل داده‌های ویژه از مواد معدنی، سنگ‌ها و برای از بین بردن اثرات جذب پس زمینه و جدا کردن جذب ماده مشخص استفاده می‌شود. گستره مقدار بازتاب بین صفر تا یک است که پس از پردازش داده‌های بازتاب طیفی به روش CR، بازتاب نسبی در اوج (محل تشخیص نمونه هدف) عدد ۱ و در نقاط دیگر، کمتر از ۱ است [۲۹].



شکل ۲ روش کار در این پژوهش.

روش فیلتر تطبیق یافته (MF) نوعی روش جداسازی است که در آن فقط اهداف انتخابی کاربر به نقشه در می‌آید. در این روش، با افزایش بازتاب طیف هدف، تصویر ورودی برای تطبیق بهتر با طیف هدف انتخاب شده فیلتر می‌شود. ارزش پیکسل در تصویر خروجی، متناسب با کسری از پیکسل که دارای ماده مورد نظر یا هدف باشد، خواهد بود. هر پیکسل با ارزش صفر یا کمتر به عنوان زمینه و ارزش‌های ۱ به عنوان تطبیق خوب با طیف مرجع، رده‌بندی می‌شود [۳۰، ۳۱]. این روش، برای شناسایی دگرسانی آرژیلی، اکسیدآهن، کربناتی و پروپلتی مناسب است که در آن مکان‌های هدف به رنگ سفید دیده می‌شوند [۳۲].

روش نقشه برداری زاویه طیفی (SAM)، شباهت بین طیف مرجع و طیف پیکسل با محاسبه زاویه بین طیف‌ها به طوری که آن‌ها را بردارهایی در یک فضای چند بعدی (که ابعاد فضا بستگی به تعداد نوارها دارد) تصور می‌کنند، تعیین می‌شود. این روش هرگاه بر داده‌های بازتابندگی واسنجی شده اجرا شود، نسبت به آثار سپیدایی و روشنایی بی تفاوت است. پیکسل‌های روشن، کمترین جورشدگی و پیکسل‌های با درجه روشنایی کمتر، بیشترین جورشدگی را با طیف مرجع نشان می‌دهد [۳۳].

بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری

به منظور تایید نتایج به دست آمده از پردازش‌های دورسنجی و بررسی واحدهای کربناتی موجود در منطقه، نمونه‌برداری و بررسی‌های صحرایی انجام شد. در این گستره، غالب واحدهای سنگی، آهک‌های رسی و قیرگون دربردارنده رگه‌های فراوان کلسیت هستند. این آهک‌ها بطور محلی به آهک ماسه‌ای تبدیل می‌شوند و به دلیل رسی بودن و عملکرد زمین‌ساخت شدید، سیمای ورقه‌ورقه، تپه‌ماهوری و به شدت فرسایش یافته نشان می‌دهند. در قسمت مرکزی گستره مورد بررسی، سنگ آهک ریفی سنگواره‌دار به رنگ خاکستری است. از سنگواره‌های موجود در این آهک می‌توان به سنگواره‌های بزرگ شامل قطعه‌های رودیست و مرجان اشاره کرد. براساس بررسی‌های سنگ‌شناسی، این واحد بازتبلور یافته و دارای رگه‌های پرشده با کانی کلسیت ثانویه و همچنین درزه‌های مزدوج ناشی از عملکرد فعالیت‌های زمین‌ساختی است. این واحد بیشتر توده‌ای و به ندرت ضخیم لایه است. در سطح رخنمون این واحد، آثار فرسایش کارستی و حفره‌های انحلالی، رگه‌های پرشده با کلسیت ثانویه و سنگواره‌های بازتبلور یافته نیز دیده می‌شود (شکل‌های ۳ و ۴). پیمایش‌های صحرایی بیانگر نفوذ یک دایک دولریتی در محل معدن در این واحد بوده که منجر به یک هاله دگرگونی آرژیلی به ضخامت یک متر و دگرگونی آهک سنگواره‌دار نزدیک خود شده است. با فاصله گرفتن از محل نفوذ دایک، از شدت دگرگونی و بازتبلور واحد آهک ریفی کاسته می‌شود. به احتمال قوی، عامل اصلی در بازتبلور و مرمری شدن این واحد آهکی و تبدیل آن به یک سنگ مرمریت با کیفیت درارتباط با نفوذ این واحد دولریتی است، به طوری که براساس بررسی‌های میکروسکوپی، توده آهک ریفی در همبری با دایک دلریتی دگرگون شده و به مرمر تبدیل شده است؛ در برخی قسمت‌ها بلورهای دولومیت زین اسبی نیز در فضاهای خالی و شکستگی‌ها دیده شده که به احتمال بسیار در ارتباط با سیال‌های منیزیم دار ناشی از نفوذ توده دولریتی و افزایش دمای ناشی از نفوذ این دایک تشکیل شده‌اند. بر اساس نتایج سنگ‌شناسی [۳۴]، این آهک‌ها را می‌توان سنگ آهک ریفی درجازا در نظر گرفت. بررسی‌های دیرینه‌شناسی بیانگر وجود سنگواره‌های تکستولاریا، اربیتولین، صدف حلقوی، مرجان‌های سنگی، میلوئیدها، لیتوکودیوم، دوکفه‌ای (اویستر)، خرده‌های زنبق دریایی، اگرگلاتوم است. بنابراین می‌توان سن آپتین- آلبین را برای این واحد در نظر گرفت.

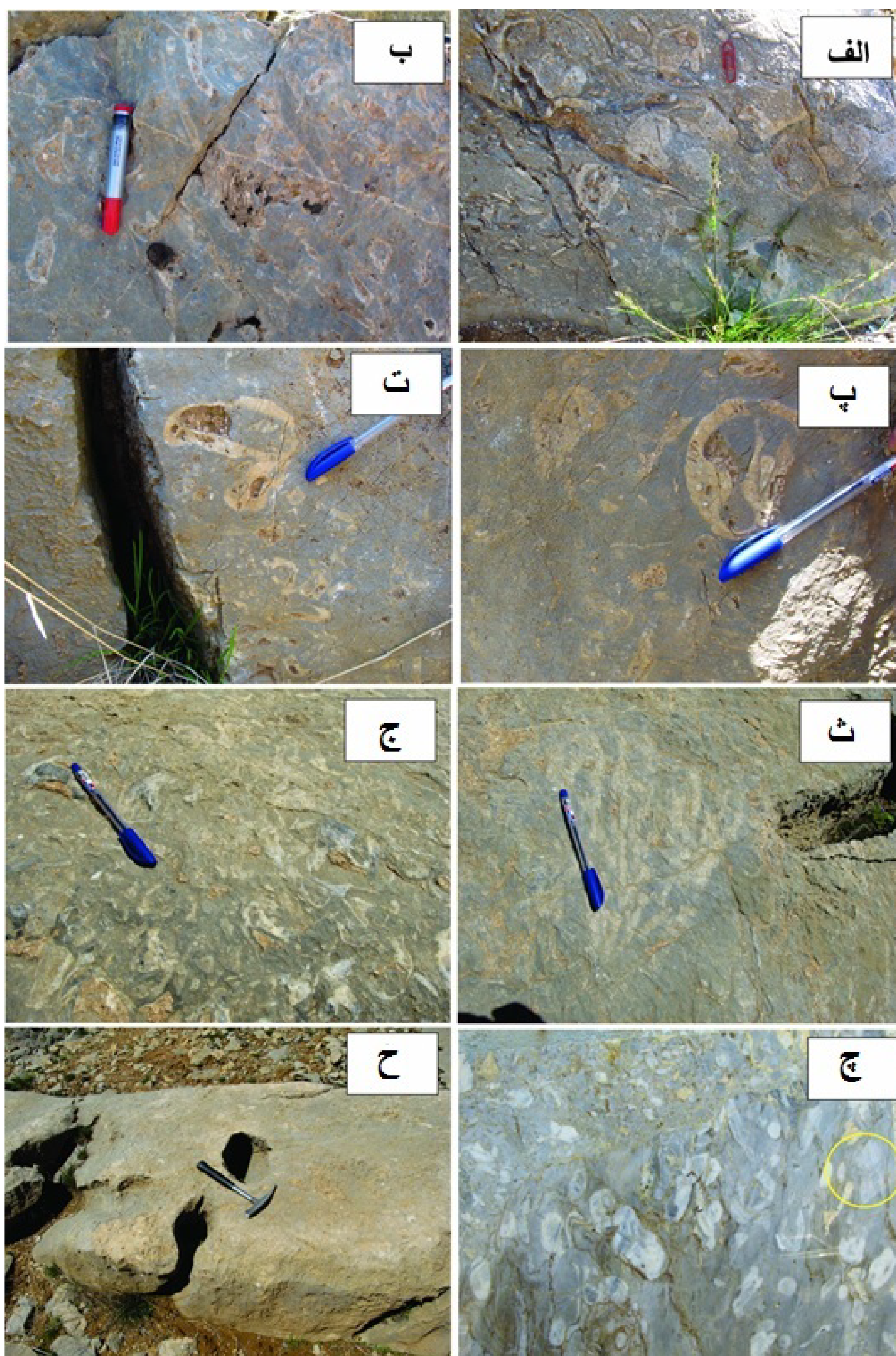
نتایج تجزیه شیمیایی ماده معدنی

به‌منظور بررسی ویژگی‌های ماده معدنی، یک نمونه (نمونه شماره 10674-AB) برای تجزیه شیمیایی به روش طیف-سنجی فلئورسانس پرتوی X (XRF) و کانی‌شناسی به روش پراش پرتوی X (XRD) به آزمایشگاه شرکت تحقیقات مواد معدنی طیف کانساران بینالود ارسال شد. نتیجه تجزیه کانی شناسی حاکی از شناسایی کلسیت بعنوان فاز کانیایی اصلی و دولومیت بعنوان فاز کانیایی فرعی است. نتایج تجزیه این نمونه در جدول ۳ آورده شده است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.14.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.461]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.14.6]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.461]



شکل ۳ واحد آهک ریفی الف تا ت) سنگواره‌های دوکفه‌ای بازتبلور یافته، ث) سنگواره مرجان بازتبلور یافته، ج) و چ) سنگواره‌های فراوان باز تبلور یافته رودیست و ح) حفره‌های انحلالی.



شکل ۴ نمایی دور از رخنمون واحد آهک ریفی: الف) نفوذ دایک دولریتی در واحد آهک ریفی که موجب دگرگونی و مرمری شدن آن شده است، دید به سمت شمال شرق، ب) وجود درزه‌های مزدوج در رخنمون آهک توده‌ای، دید به سمت شمال، پ) دسته درزه‌های مزدوج، دید به سمت شمال و ت) رخنمون آهک ریفی، دید به سمت جنوب.

جدول ۳ نتایج تجزیه شیمیایی.

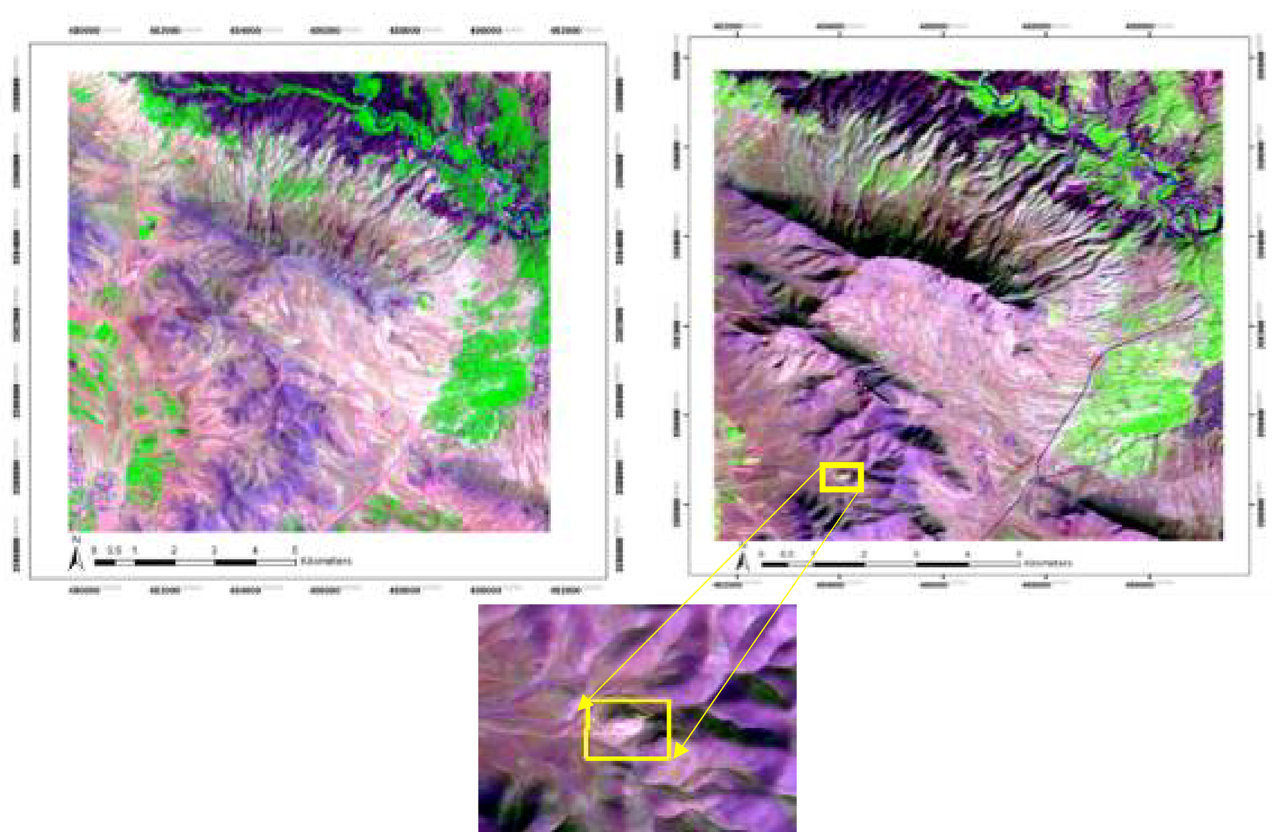
ردیف	ترکیب شیمیایی اکسید عناصر	درصد وزنی	
۱	SiO2	۰/۳۰	
۲	Al_2O_3	۰/۰۹	
۳	Na_2O	۰/۰۱	
۴	MgO	۰۱/۵۳	
۵	K_2O	۰/۰۳	
۶	TiO_2	۰/۱۲	
۷	MnO	۰/۰۱	
۸	CaO	۵۳/۴۹	
۹	P_2O_5	۰/۰۲	
۱۰	Fe_2O_3	۰۶۷	
۱۱	SO_2	۰/۰۰	
۱۲	مواد فرار (LOI)	۴۳/۷۳	

نتایج بررسی تصاویر ماهواره‌ای

پس از انجام تصحیحات پرتوسنجی و جوی بر تصاویر ماهواره‌ای استر و سنتینل ۲، به منظور بهبود تفکیک مکانی داده‌های استر، شامل همه نوارهای ۱۵ و ۳۰ متری (مرئی و فروسرخ موج کوتاه)، با کمک نوار همه رنگ از سنجنده سنتینل ۲، عملیات ادغام انجام شد و تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر بدست آمد (شکل ۵ ب). با توجه به اهمیت نوار ۸ سنجنده استر برای شناسایی کانی کلسیت، از این نوار در ترکیب رنگی ۸۳۱ (R:8, G:3, B:1) استفاده شد و در منطقه معدن آهک که در شکل ۵ ب مشخص است، این گستره به رنگ صورتی-سفید آشکار شد. همچنین در تصویر به دست آمده از ادغام دو تصویر با تفکیک مکانی ۳۰ و ۱۰ متری معدن آهک و نواحی دیگر منطقه به شکل مطلوب‌تری قابل تشخیص است (شکل ۵ پ).

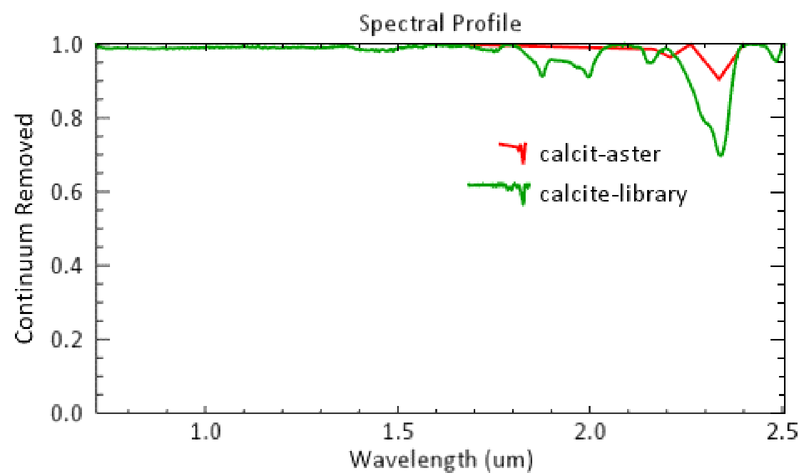
بر تصویر با تصحیح جوی در محل معدن آهک ، رفتار طیفی پیکسلی که بطور قطع از نوع کلسیت است استخراج و با رفتار طیفی این کانی از کتابخانه طیفی USGS در یک نمودار مقایسه شد. دیده می‌شود که هر دو نمودار تقریبا مشابه هستند و جذب این کانی در گستره ۲٫۳ تا ۲٫۳۵ میکرومتر آشکار است (شکل ۶).

شکل ۷ نتایج محاسبه شاخص طیفی کلسیت (CI، رابطه ۱) را نشان می‌دهد. در تهیه این تصویر، رفتار جذبی کانی کلسیت در نوار ۸ (در مخرج کسر CI) و بازتاب این کانی در نوارهای ۶ و ۹ (در صورت کسر) باعث شد که شاخص کلسیت نواحی کلسیت دار را به خوبی تشخیص دهد، بطوری که نواحی دارای ارزش ۱(نواحی سفید رنگ) بیانگر کلسیت و کمتر از ۱ بدون کلسیت هستند.

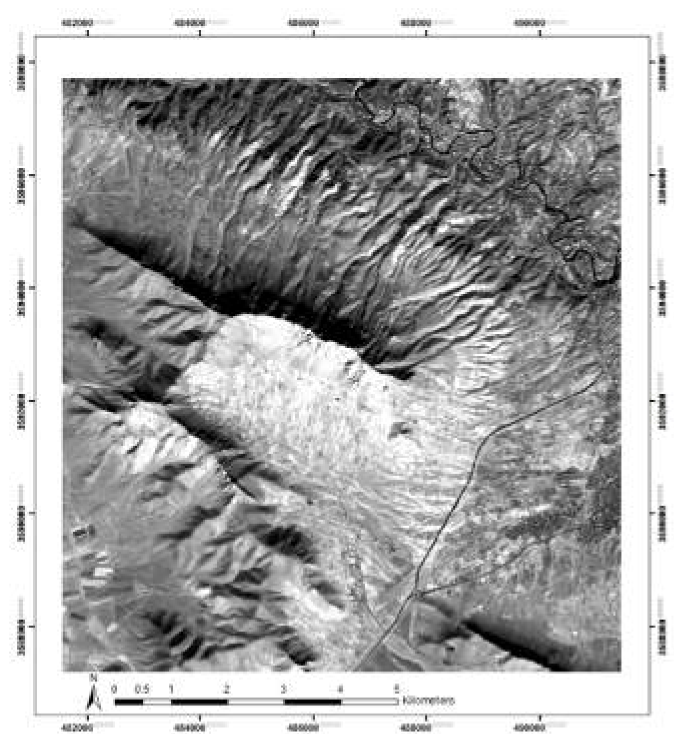


شکل ۵ الف) تصویر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری و ب) تصویر برآمده از ادغام داده‌های استر با سنتینل ۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر، پ) تصویر ترکیب رنگی ۸۳۱ از سنجنده استر و منطقه معدن آهک مورد بررسی.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.14.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.461]



شکل ۶ رفتار طیفی کانی کلسیت(پیکسل خالص کلسیت) بر نوار ۸ و تطابق آن با رفتار طیفی این کانی در کتابخانه طیفی USGS.

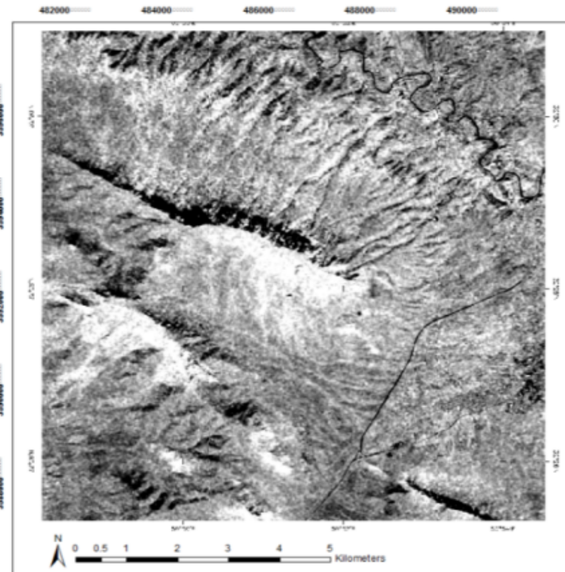


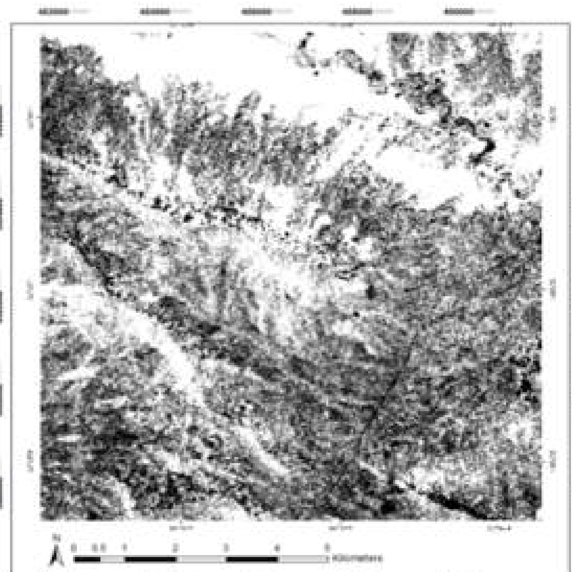
شکل۷ تصویر شاخص طیفی کلسیت CI

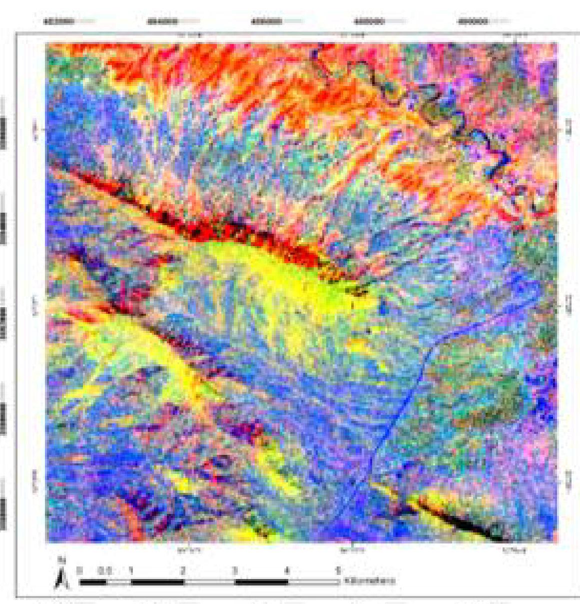
با توجه به مشخص بودن منطقه معدن آهک و اطمینان از درستی آن (بازدید میدانی از منطقه) و اطمینان از پیکسل کانی کلسیت (مقایسه نمودار طیفی کلسیت با داده‌های کتابخانه طیفی)، از پیکسل‌های آن منطقه به عنوان پیکسل هدف و رفتار طیفی در آن به عنوان ورودی در الگوریتم‌ها استفاده شد. شکل ۸ نشان می‌دهد که اجرای روش حذف پیوستار نواحی جذب کانی کلسیت در نوارهای مختلف را با پیکسل‌هایی به رنگ سفید آشکار کرد. از بین نوارهای به دست آمده، نوار ۵ نواحی گسترده‌ای را به عنوان کانی کلسیت شناسایی کرده است، نوار ۶ به نسبت کمتر ولی نوار ۸ برای نواحی‌ای که باید سفیدتر و به عنوان انباشت کانی کلسیت شناسایی کند ضعیف عمل کرده است. شکل ۸، CR در گستره نوارهای ۵، ۶ و ۸ تصاویر ایجاد شده را نشان می‌دهد که با ترکیب نوارهای CR، نواحی به رنگ زرد را کلسیت تشخیص

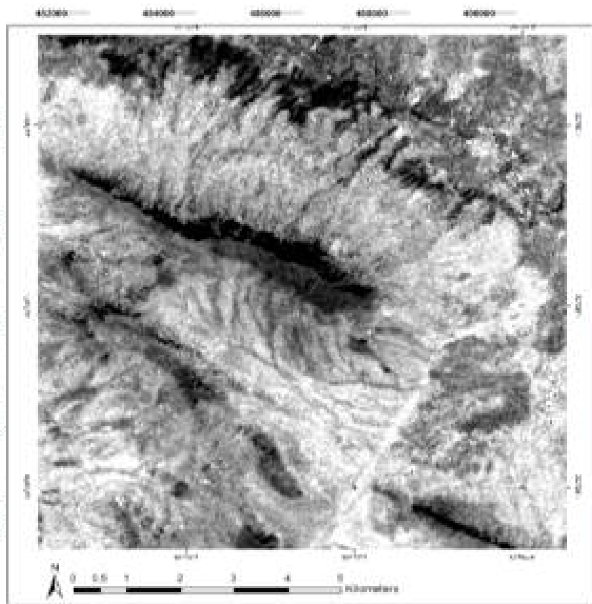
داده است؛ این میزان بیش از مقدار واقعی حتی در منطقه معدن آهک است.

در تصویر برآمده از الگوریتم MF (شکل ۹) نیز نواحی سفید دارای کانی کلسیت و نواحی تیره‌تر بدون کلسیت شناسایی شه است. در این روش، پیکسل هدف از ناحیه معدن آهک انتخاب شده و با اعمال بر همه تصویر، نواحی دارای کلسیت که رفتار طیفی مشابه با پیکسل انتخابی داشتند را با تن روشن تر تشخیص داد.

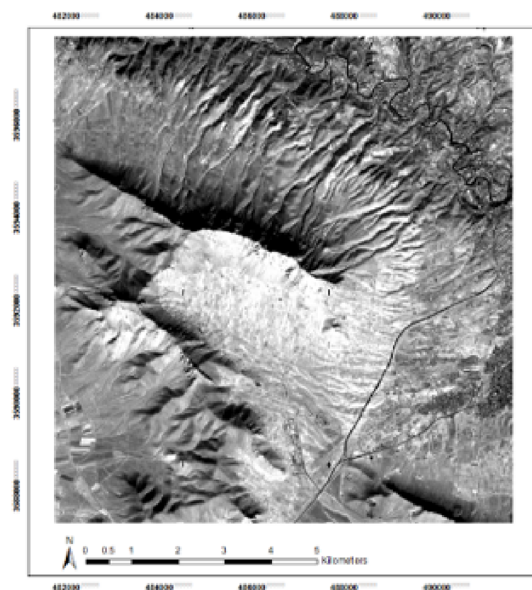






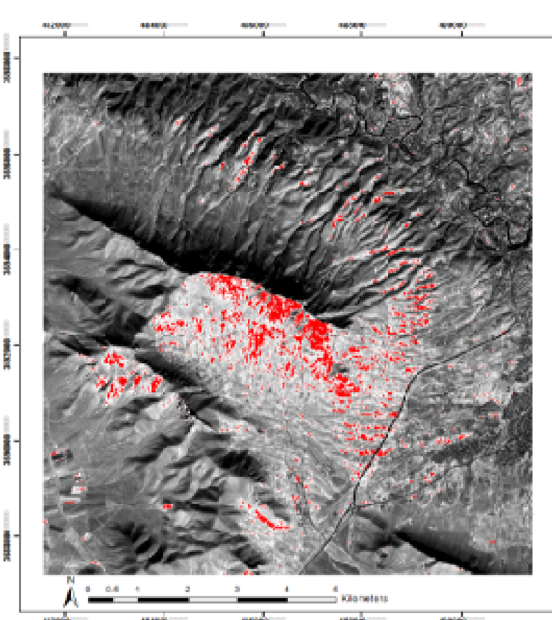


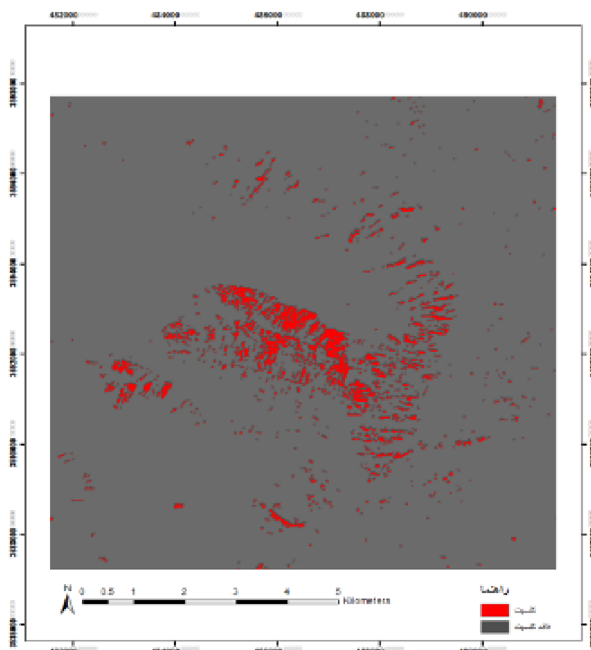
شکل ۸ تصاویر به دست آمده از روش حذف پیوستار: الف) نوار ۶ ، ب: نوار ۵ ، پ: نوار ۸ و ت: ترکیب نواری ۵۶۸ با روش حذف پیوستار.



شکل ۹ تصویر به دست آمده از الگوریتم MF.

شکل ۱۰، نتیجه رده‌بندی به روش SAM را نشان می‌دهد. در این رده‌بندی، بر اساس رفتار طیفی یک پیکسل ویژه کانی کلسیت بر تصویر MF به عنوان مبنا قرار گرفت و کل تصویر پیکسل‌هایی که رفتار طیفی مشابه پیکسل کلسیت داشتند رده‌بندی شدند. نواحی قرمز استخراج شده بر تصویر شاخص طیفی کلسیت، CI، قرار داده شد و همخوانی خوبی آشکار شد که بیانگر رده بندی قابل قبول این روش است. جدول ۴ نشان می‌دهد که مناطقی که نقشه رده بندی SAM کلسیت تشخیص داده است ۸۳٫۶۶ درصد با شاخص طیفی کلسیت همخوانی دارند. SAM همچنین ۱۶٫۳۴ درصد را بدون رده تشخیص داده است، به این معنا که نواحی‌ای که کلسیت در شاخص مشخص شده بود، در نقشه SAM رده‌بندی نشده اند. سطحی که شاخص طیفی از کلسیت تشخیص داده است ۴٫۲۱ کیلومتر مربع است. نقشه رده‌بندی SAM، ۲٫۳ کیلومتر مربع کلسیت شناسایی کرده است.





شکل ۱۰ نقشه رده‌بندی SAM و نقشه رده‌بندی SAM بر تصویر شاخص طیفی.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.14.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.461]

جدول ۴ نتایج تقابل میزان کلسیت شناسایی شده با نقشه رده بندی SAM و شاخص طیفی کلسیت (CI)

کلسیت به دست آمده از نقشه رده بندی SAM	**نقشه SAM / شاخص طیفی CI**
۸۳٫۶۶	درصد کلسیت در شاخص طیفی کلسیت
۱۶٫۳۴	درصد گستره بدون رده بندی
۲٫۳۹	سطح کلسیت در شاخص طیفی کلسیت(کیلومتر مربع)
۰٫۴۷	سطح گستره بدون رده بندی (کیلومتر مربع)

برداشت

شواهد صحرایی در گستره مورد بررسی بیانگر رخنمون گسترده واحد سنگ‌آهک رسی و قیرگون با رنگ خاکستری تیره دارای رگه‌های فراوان کلسیت است. این آهک‌ها بطور محلی به آهک ماسه‌ای تبدیل می‌شوند و به دلیل رسی بودن و عملکرد زمین ساخت شدید بصورت ورقه‌ورقه هستند و رخنمون تپه‌ماهوری و به شدت فرسایش یافته نشان می‌دهند. تنها در بخش مرکزی، رخنمونی از یک سنگ آهک توده‌ای تا ضخیم لایه سنگواره‌دار ریفی به رنگ خاکستری کم‌رنگ و خاکستری تیره در سطح تازه (که توده معدنی مربوط به این واحد است) دیده می‌شود. نتایج تجزیه شیمیایی این واحد بیانگر بالا بودن مقدار کانی کلسیت (۹۷٫۲۲درصد) است (جدول ۳). مقدار بالای کلسیت در منطقه مورد نظر منجر به بازتاب بالای این کانی در واحد آهک ریفی نسبت به واحدهای کربناتی پیرامون شده است. پردازش‌های انجام شده بر تصاویر استر و سنتینل ۲ نشان داد که با ترکیب نواری ۸۳۱، کانی کلسیت به صورت کلی قابل شناسایی است. به عبارتی، طول موج جذب سنگ های آهکی در گستره ۲٫۳۳ تا ۲٫۳۵ میکرومتر است که با نوار ۸ داده استر همخوانی طول موجی دارد. این ترکیب رنگی با گستره طول موج بیان شده توانست سنگ های آهکی (کلسیتی) را به رنگ صورتی- سفید از دیگر سنگها تشخیص دهد [۱۰، ۲۱، ۲۲]. همچنین در این پژوهش، برای تفسیر چشمی منطقه مورد بررسی، تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری نسبت به تصاویر ۳۰ متری کمک بیشتری در تشخیص مناطق آهکی داشت. داده کمکی سنتینل ۲، عملکرد خوبی به عنوان نوارهمه رنگ در روش ادغام داده ها با داده های چند طیفی با قدرت تفکیک مکانی کمتر ایفا کرد [۲۶]. به منظور افزایش دقت، شاخص طیفی و سرانجام رده بندی نوارها، بر اساس عملکرد طیفی این کانی ارزیابی شد. با توجه به چگونگی جذب و بازتاب کلسیت در نوارهای فروسرخ موج کوتاه، شاخص طیفی کلسیت نواحی دارای این کانی را به خوبی شناسایی می‌کند. در تصویر بر پایه این شاخص طیفی، نواحی با خلوص بالای کانی کلسیت به رنگ سفید با درجه ۱ و به طور مشخص از نواحی بدون کانی کلسیت (نواحی تیره رنگ) قابل شناسایی است. رفتار این شاخص در تشخیص این کانی توسط پژوهشگران دیگر نیز تاییدی بر درستی آن است [۱۳، ۱۴]. به منظور تایید داده های به دست آمده از شاخص طیفی بالای کانی کلسیت، این نواحی نمونه‌برداری و تجزیه زمین‌شیمیایی شدند و نتایج معیاری برای درستی این رده‌بندی در نظر گرفته شد. از طرف دیگر، از میان الگوریتم های مختلف آشکارسازی، در این منطقه الگوریتم CR دقت قابل قبولی نداشت و سطح تشخیص داده شده به عنوان کانی کلسیت بیش از واقعیت بود. برای انجام این الگوریتم آثار زمینه در محل کانی کلسیت باید کمینه شود و نواحی کلسیت دار بارزتر شود. نوارهای ۴ و ۷ به دلیل تداخل طیفی بسیار حذف شدند. در نوار ۵، روش CR نتوانست اثر زمینه را برای کانی کلسیت جدا کند، زیرا سطح تشخیص داده شده با ارزش ۱ را بیش از مقدار واقعی شناسایی کرد. نوار ۶ بطور نسبی این کانی را درست تشخیص داد، ولی نوار ۸ که گستره جذبی کانی کلسیت است با دقت کمتری نواحی کلسیت را جدا کرد. این روش نتیجه متفاوت با نتیجه الیات و همکاران [۱۱] نشان داد که ایشان اثر روش CR را برای ۲۳۳۸ نانومتر بهترین روش برای تشخیص کانی کلسیت معرفی کردند. در روش دیگر، الگوریتم MF شناسایی نزدیکتری به نواحی کلسیت‌دار را نشان داد [۱۸]. نقشه رده‌بندی شده زاویه بردار طیفی SAM با تاکید بر پیکسل های خالص کلسیت در نوارهای ۸ و MF در معدن آهک، نیز بیانگر پراکندگی این کانی در نواحی دیگر از منطقه معدن مورد بررسی است. مساحت نواحی کلسیت در نقشه رده‌بندی SAM نسبت به تصویر شاخص طیفی کلسیت نشان می دهد که این نقشه به میزان ۸۳٫۶۶ درصد به نقشه مبنا (شاخص کلسیت) نزدیک است و درستی رده‌بندی را به

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.2.14.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.2.461]

خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱۰ و جدول ۴) و با نتایج دیگران همخوانی دارد [۳، ۱۵، ۲۰-۲۲]. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش نیز بیانگر ماهیت قیرگون و رسی و خلوص پایین کانی کلسیت در دیگر واحدهای کربناتی منطقه مورد بررسی است، به طوری که این امر به روشنی در تصاویر و موارد یاد شده در بالا مشهود است. براساس نتایج این پژوهش، فناوری سنجش از دور قابلیت ویژه‌ای در شناسایی مواد معدنی دارد و به خوبی می‌توان به خروجی‌های این روش اطمینان نمود و از آن برای شناسایی واحدهای کربناتی با خلوص بالای کانی کلسیت در مناطق دیگر نیز استفاده کرد.

قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد در به ثمر رساندن این پژوهش قدردانی می‌کنند.

مراجع

[1] Ranjbar H, Shahriari H., *" Comparison of ETM+ and ASTER data for hydrothermal alteration mapping in the central part of the Dehaj-Sarduyeh belt, Kerman Province".* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 2 (2006)367-382.

[2] Amer R., Kusky T.M., GHULAM A., *"Lithological mapping in the central eastern desert of Egypt using ASTER data"*. Journal of African Earth Sciences 56(2–3) (2010) 75-82.

[3] Rohbakhsh P., Ebrahimi Kh., Homam M., Abasnia H.,*"Geology, alteration, mineralization and geochemistry studies in Dahaneh Qaleh exploration prospect, northwestern Bardeskan"*. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 18 (4) (2011) 581-600

[4] Tangestani M., Gholami M., *"Comparison of sub-pixel and per-pixel classification of ASTER data for determining the abundance of clay and carbonate of Mishan marly Formation".* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 21 (2) (2013):277-288

[5] Miri Bidokhti R., Karimpor M.H., Mazaheri A., *"Studies of remote sensing, geology, alteration, mineralization and geochemistry of Balazard copper-gold prospecting area, west of Nehbandan"*. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 22 (3) (2014) 459-470

[6] Rajendran S., Nasir Sobhi, *" ASTER mapping of limestone formations and study of caves, springs and depressions in parts of Sultanate of Oman".* Environmental Earth Sciences, 71(2014a) 133–146.

[7] Hosseinkhani A., Karimpor M.H., Malekzadehe A., *"Petrography, mineralogy of alteration zones, and geochemical exploration in Southwest of Sorkh Kuh prospect area, Eastern Iran"*. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 23 (3) (2015)403-416

[8] Clark R. N. *"Spectroscopy of rock and minerals and principles of spectroscopy"*. In A. N. Rencz (Ed.), Remote sensing for the earth sciences: Manual of remote sensing 3(3) (1999) 3–58.

[9] Gupta R. P., *" Remote Sensing Geology (2nd ed.) "*. Heidelberg: Springer. (2003)

[10] Basavarajappa H. T., L. Jeevan S., Rajendran, Manjunatha M. C., *"Aster Mapping of Limestone Deposits and Associated Lithounits of Parts of Chikkanayakanahalli, Southern Part of Chitradurga Schist Belt, Dharwar Craton, India."* Journal of the Indian Society of Remote Sensing 47, no. 4 (2019) 693-703.

[11] Alayet F., Mezned N., Sebai A., Abdeljaouad S., *"Continuum removed band depth analysis for carbonate mining waste quantification using x-ray diffraction and hyperspectral spectroscopy in the north of Tunisia"*. Journal of Applied Remote Sensing. 11(1) (2017)016021:1-12

[12] Yamaguchi Y., Naito C., *" Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands",* International Journal of Remote Sensing, 24(22) (2003) 4311–4323

[13] Hassan S.M., Sadek M.F., *"Geological mapping and spectral based classification of basement rocks using remote sensing data analysis: The Korbiai-Gerf nappe complex, South Eastern Desert, Egypt"*. Journal of African Earth Sciences 134 (2017) 404-418

[14] Anees M., Shoukat M., Akbar Khan M., Abbasi M., *"Comparison of Remote Sensing Algorithms for Discrimination of Major Rock Units Using ASTER Data at Lakhra Anticline, Sindh, Pakistan"*. Journal of Space Technology, 7(1) (2017)

[15] Galvão L.S., Almeida-Filho R., Vitorello Í., *"Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: evaluation in a tropical savannah environment"*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 7(2) (2005)107–114.

[16] Amer R., Kusky T., El Mezayen A., *" Remote sensing detection of gold related alteration zones*

[26] Kabolizadeh M., Rangzan K., Mohammadi Sh., *"Application of Integrated Landsat-8 and Sentinel-2 Satellite Images in Environmental Monitoring"*. Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources. 9 (3) (2018) 53-71.

[27] Ninomiya Y., "*Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data*." In Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII, International Society for Optics and Photonics, vol. 5234, (2004) pp. 180-190.

[28] Clark Roger N., Ted L. Roush, "*Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications*." Journal of Geophysical Research: Solid Earth 89, no. B7 (1984): 6329-6340.

[29] Luo S., He Y., Wang Z., Duan D., Zhang J., Zhang Y., Sun J., *" Comparison of the retrieving precision of potato leaf area index derived from several vegetation indices and spectral parameters of the continuum removal method"*. European Journal of Remote Sensing, 52(1)(2019) 155-168.

[30] Borengasser M., Hungate WS., Watkins R., *" Hyperspectral remote sensing: principles and applications"*. Crc press, Boca Raton. (2007) 128 p

[31] Mitchell J.J., Glenn N.F., *"Subpixel abundance estimates in mixturetuned matched filtering classifications of leafy spurge (Euphorbia esula L.) "*. International Journal of Remote Sensing, 30 (2009)6099–6119.

[32] Ismaili c., khakzad A., Behzadi M., Vosoughi Abedi M., "*"Study of Iron Ore Alterations by Remote Sensing in Camus Region (Meymeh-Isfahan)"*. Journal of Environmental Geology. 12 (43) (2018) 27-47

[33] Mazhari N., Malekzadeh Shafaroudi A., Qaderi, *"Advanced Surveying of Different Types of Iron, Endoscarine and Exoscaren Minerals in Sangan Khaf Iron Ore Dept., Khorasan Razavi Province Using Ester Data"*. Advanced Applied Geology, 4 (11) (2014) 18-29.

[34] Embry A.F., Klovan J.E., *" A late Devonian reef tract on Northeastern Banks Island"*, NWT: Canadian Petroleum Geology Bulletin, V:19 (1971) 730-781.

in Um Rus area, central Eastern Desert of Egypt". Adv Space Res 49(1) (2012)121–134

[17] Karim Pour H., h. Malekzadeh Shafaroudi A., *" Satellite data processing to identify bentonite deposits of cedic and calcite type in eastern Iran"*. Journal of Advanced Applied Geology. 21 (2016)84 -96.

[18] Rowan LC., Mars JC., *"Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data"*. Remote Sensing of Environment, 84 (2003) 350- 366.

[19] Rowan L.C., Robert GS., John C., *"Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data"*. Remote Sensing of Environment, 104 (2006) 74-87.

[20] Qiu F., Abdelsalam M., Thakkar P., *"Spectral analysis of ASTER data covering part of the Neoproterozoic Allaqi-Heiani suture, Southern Egypt"* . Journal of African Earth Sciences ,44 (2006) 169–180.

[21] Rajendran S., Nasir S., *"ASTER spectral sensitivity of carbonate rocks – Study in Sultanate of Oman"*. Advances in Space Research 53 (2014b) 656–673

[22] Rajendran S., Nasir S., El-Ghali M., Alzebdah K., Salim Al-Rajhi A., Al-Battashi M., *"Spectral Signature Characterization and Remote Mapping of Oman Exotic Limestones for Industrial Rock Resource Assessment"*. Geosciences, 8(4) (2018) p.145.

[23] Geological zones of Iran (New version) (Croatian) based on- NGDIR: Geological Map of Iran, - J. V. Harrison: Cambridge History of Iran 1: Land of Iran, - Eckart Ehlers: (Encyclopaedia Iranica): Geology, M. Alavi: Tectonics of the Zagros Orogenic belt of Iran, Nima Nezafati: Geology of Iran (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geological zones of Iran (Cro).PNG)

[24] Zahedi M., Rahmati Ilkhchi M., Vaezipour J., *"Shahrekord Geological Map, scale 1: 250000, Geological Survey of Iran"*. (1992).

[25] Rahmati Ilkhchi M., *"Geological Map Description Sheet 1: 100,000 Shahrekord, Geological Survey of Iran "*(2016)